

(12) NACH DEM VERTRAG FÜR DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
18. Dezember 2003 (18.12.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer

WO 03/105246 A2

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: H01L 41/24,  
41/083, 41/047

49a, 07927 Hirschberg (DE). WEHRSDORFER, Eike  
[DE/DE]; Jenaer Strasse 18a, 07607 Eisenberg (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP03/05051

(74) Anwälte: KRUSPIG, Volkmar usw.; Meissner, Bolte &  
Partner, Postfach 860 624, 81633 München (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:  
14. Mai 2003 (14.05.2003)

(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,  
CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH,  
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,  
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,  
MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE,  
SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,  
VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
102 25 405.2 7. Juni 2002 (07.06.2002) DE  
102 34 787.5 30. Juli 2002 (30.07.2002) DE

(84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH,  
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),  
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,  
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,  
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,  
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US): PI CERAMIC GMBH KERAMISCHE  
TECHNOLOGIEN UND BAUELEMENTE [DE/DE];  
Lindenstrasse, 07589 Lederhose (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): HEINZMANN, Astrid  
[DE/DE]; Eichenstrasse 25, 07549 Gera (DE). HENNIG,  
Eberhard [DE/DE]; Tachover Ring 7, 07646 Stadtroda  
(DE). KOPSCH, Daniel [DE/DE]; Ortsteil Dautzschen,  
Vorstadt 7, 04886 Grosstreiben-Zwethau (DE). PERTSCH,  
Patrick [DE/DE]; Rodaer Strasse 17e, 07629 Hermsdorf  
(DE). RICHTER, Stefan [DE/DE]; Göritz, Ortsstrasse

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-  
öffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-  
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-  
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der  
PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD FOR THE PRODUCTION OF A MONOLITHIC MULTILAYER ACTUATOR, MONOLITHIC MULTI-  
LAYER ACTUATOR MADE OF A PIEZOCERAMIC OR ELECTROSTRICTIVE MATERIAL, AND EXTERNAL ELECTRI-  
CAL CONTACT FOR A MONOLITHIC MULTILAYER ACTUATOR

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES MONOLITHISCHEN VIELSCHICHTAKTORS SOWIE, MO-  
NOLITHISCHER VIELSCHICHTAKTOR AUS EINEM PIEZOKERAMISCHEN ODER ELEKTROSTRIKTIVEN MATERIAL  
SOWIE ELEKTRISCHE AUSSENKONTAKTIERUNG FÜR EINEN MONOLITHISCHEN VIELSCHICHTAKTOR

(57) Abstract: Disclosed are a method for the production of a monolithic multilayer actuator, a corresponding monolithic multilayer actuator, and an external electrical contact for a monolithic multilayer actuator. Microdisturbances are incorporated in a specific manner into the actuator structure along the longitudinal axis of the stack thereof, essentially parallel to and at a distance from the inner electrodes in the area of the at least two opposite outer surfaces to which the conventional inner electrodes are brought out. Said microdisturbances are subjected to a predefined, restricted, voltage-reducing growth towards the inside and/or towards the outer electrode no sooner than the time that the actuator is polarized. The basic metallic coating and/or external contact is/are embodied in a tensile-resistant or elastic manner at least in the area of the microdisturbances within the actuator structure.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors, einen entsprechenden Vielschichtaktor sowie eine Aussenkontaktierung für einen monolithischen Vielschichtaktor. Erfindungsgemäss sind entlang der Stapellängsachse des Aktors im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, von diesen beanstandet, im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Aussenflächen, zu denen die an sich bekannten Innenelektroden herausgeführt sind, gezielt Mikrostörungen im Aktorgefüge eingebaut, welche frühestens beim Polarisieren des Aktors einen vorgebenen, begrenzten, spannungsabbauenden Wachstum in das Innere und/oder zur Aussen Elektrode unterliegt, wobei weiterhin die Grundmetallisierung und/oder Aussenkontaktierung mindestens im Bereich der Mikrostörungen im Aktorgefüge dehnungsresistent oder elastisch ausgebildet ist.



WO 03/105246 A2

Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors sowie,  
monolithischer Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven  
Material sowie elektrische Aussenkontaktierung für einen monolithischen  
Vielschichtaktor

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor als Stapelanordnung in quasi mechanischer Reihenschaltung einer Vielzahl von Piezoplatten durch Sintern durch Grünfolien ausgebildet wird, vorhandene Innen-  
elektroden im Plattenstapel zu gegenüberliegenden Außenflächen des Stapels ge-  
führt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Außenkontaktierung jeweiliger  
Elektrodengruppen parallel verschalten sind gemäß Oberbegriff des Patentanspru-  
ches 1. Weiterhin betrifft die Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktor aus  
einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor eine Sta-  
pelanordnung von Piezoplatten ist, welche über innere Elektroden, eine gemeinsame  
Grundmetallisierung sowie Außenkontaktierung verfügt gemäß Oberbegriff des Pa-  
tentanspruches 13 sowie eine elektrische Außenkontaktierung für einen monolithi-  
schen Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material  
gemäß Oberbegriff des Patentanspruches 21.

Piezokeramische Aktoren sind elektro-mechanische Wandler, bei denen der reziproke piezoelektrische Effekt ausgenutzt wird. Legt man an eine piezokeramische Platte mit Elektroden auf ihren Hauptflächen, die in Richtung der Plattendicke polarisiert ist, ein elektrisches Feld an, so kommt es zu einer Formänderung. Konkret vollzieht sich eine Ausdehnung in Richtung der Plattendicke, wenn das angelegte elektrische Feld parallel zum ursprünglichen Polungsfeld gerichtet ist. Gleichzeitig kommt es senkrecht zur Feldrichtung zu einer Kontraktion.

Durch Übereinanderstapeln einer Vielzahl solcher Platten im Sinne einer mechanischen Reihenschaltung und elektrischer Parallelschaltung der Platten, können so die Deformationen der einzelnen Platten addiert werden. Bei einem Dehnvermögen von etwa 0,1 - 0,2 % bei Feldstärken von 2 kV/mm lassen sich so Auslenkungen von etwa 1 - 2  $\mu\text{m}$  pro mm Bauhöhe realisieren.

Bei monolithischen Vielschichtaktoren erfolgt das Stapeln bereits im grünen Zustand und die endgültige Verbindung wird durch Sintern vorgenommen. Hierbei werden bis zu einigen hundert piezokeramische Grünfolien alternierend mit metallischen Innenelektroden gestapelt, verpreßt und zu einem monolithischen Körper gesintert. Die Innenelektroden werden dabei wechselseitig auf die gegenüberliegenden Flächen bis zur jeweiligen Oberfläche herausgezogen und dort im Regelfall durch eine Grundmetallisierung in Dick- oder Dünnschichtausführung miteinander verbunden.

Dieses Design wird auch als Ausführung mit Interdigitalelektroden bezeichnet. Ein piezoelektrischer Aktor umfasst also piezokeramische Schichten und Gruppen von inneren Elektroden, die jeweils auf gegenüberliegende Flächen bis an die Oberfläche führen. Eine Grundmetallisierung dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Weiterhin sind inaktive Bereiche vorhanden, die weder beim Polarisieren noch beim üblichen Betrieb des Aktors piezoelektrisch gedehnt werden.

Diese inaktiven Bereiche in den Multilayaktoren mit interdigitalen Elektroden stellen ein kritisches Moment für die Herstellbarkeit und Zuverlässigkeit derartiger Produkte bzw. unter Rückgriff auf solche Produkte realisierter Finalerzeugnisse dar. Aufgrund der hohen Zug- Spannungskonzentrationen in den inaktiven Bereichen und in Verbindung mit der geringen Zugfestigkeit der piezokeramischen Werkstoffe kommt es bereits bei der Polarisierung, die mit remanenten Dehnungen von bis zu 0,3 % verbunden ist oder aber später beim Betrieb zu unerwünschten Rissbildungen.

Die vorgenannte unkontrollierte Rissbildung hat verschiedenste Ausfallmechanismen der Aktoren zur Folge. Setzt sich das Risswachstum in das Innere des Aktors fort, kann dies einerseits zur mechanischen Zerstörung des Aktors führen, andererseits können hierdurch bedingt innere Überschlüsse auftreten, wenn der Riss von einer Elektrodenschicht zur anderen wächst. Mit einer geeigneten Prozessführung kann das Risswachstum in das Innere des Aktors begrenzt werden. Nicht verhindert werden kann allerdings das Risswachstum in Richtung der Aktoroberfläche. Erreicht der Riss die Aktoroberfläche, führt dies zur Unterbrechung der auf der Oberfläche aufgetragenen Grundmetallisierung. Hierdurch werden Teilbereiche des Aktors galvanisch von der Spannungszuführung abgetrennt und infolge dessen treten elektrische Überschlüsse an den Unterbrechungen der Grundmetallisierung auf. Diese Überschlüsse wiederum sind der Grund, die letztendlich zum Totalausfall des Aktors führen.

Zur Überwindung der zitierten Rissproblematik sind eine Vielzahl von Lösungen bekannt, die entweder die Verhinderung der Rissbildung oder bei nicht zu vermeidenden unkontrollierten Rissbildungen ein Reduzieren oder Eliminieren von Überschlängen an der Grundmetallisierung auf die Oberfläche durch zusätzliche Maßnahmen zum Ziel haben.

Die JP 58-196077 offenbart einen Multilayeraktor und ein Verfahren zu seiner Herstellung, bei dem entlang der Aktorachse eine Vielzahl von Schlitzten mit einer Tiefe von etwa 0,5 mm parallel zu den inneren Elektroden in den Aktor eingebracht wird.

Diese Schlitzte führen ähnlich wie die aus anderen Bereichen der Technik bekannten Dehnungsfugen zum Abbau von Spannungskonzentrationen und verhindern somit eine unkontrollierte Rissbildung oder ein Wachstum des Risses im Aktorgefüge.

Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass durch diese Schlitzte auch der tragende Querschnitt des Aktors verringert ist, was gleichzeitig die Druckbelastbarkeit des Aktors im Einsatz verringert. Beim angegebenen Beispiel reduziert sich der tragende Querschnitt des Aktors auf  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  bei einem Gesamtquerschnitt von  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ .

Das zitierte Verfahren, bei dem die Schlitzte durch thermisch zersetzbare Schichten auf den grünen Keramikfolien beim Sintern gebildet werden, weist auch auf weitere Probleme hin, die beim Sintern zu einem ebenfalls unkontrollierten Risswachstum führen können und die nur durch spezielle aufwendige Ausgestaltungen der inneren Elektroden verhinderbar sind. Als Ursache für die Rissbildung beim Sintern wird dort die inhomogene Verdichtung des grünen Stapels beim Verpressen erwähnt.

Bei der EP 0 844 678 A1 wird ebenfalls auf die Problematik der Rissbildung und deren Folgen eingegangen, wenn durch die Risse die Grundmetallisierung zerstört wird.

Zur Vermeidung von Schädigungen des Aktors wird dort vorgeschlagen, zwischen der Spannungszuleitung und der Grundmetallisierung eine dreidimensional strukturierte elektrisch leitfähige Elektrode einzufügen, die nur partiell mit der Grundmetallisierung verbunden ist und die zwischen den Kontaktstellen dehnbar ausgebildet wird. Die praktische Realisierung einer solchen dreidimensionalen Struktur erfordert aber einen sehr hohen Aufwand, da die partiellen Kontaktstellen einen definierten Abstand in der Größenordnung des Abstandes der inneren Elektroden haben müssen.

Bei der Anordnung für eine sichere Kontaktierung von piezoelektrischen Aktoren nach DE 196 46 676 C1 wird an der als Kontaktstreifen ausgebildeten Grundmetallisierung eine elektrische leitende Kontaktfahne mit hoher Rissfestigkeit so angebracht, dass ein überstehender Bereich der Kontaktfahne verbleibt. Dabei muss der überstehende Bereich der Kontaktfahne so groß ausgebildet werden, dass auftretende Risse die Kontaktfahne nicht vollständig durchtrennen. Eine solche Anordnung ist aber sehr empfindlich beim Handling. Bekanntlich besitzt die Grundmetallisierung auf der Oberfläche des piezokeramischen Aktors nur eine sehr geringe Schälfestigkeit. Bereits geringe Schälkräfte führen zur Ablösung der Grundmetallisierung von der Aktoroberfläche und somit zum teilweisen oder vollständigen Verlust der elektrischen Kontaktierung zu den Innenelektroden.

Eine weitere Variante, dass Risswachstum vom Aktorkörper zur Oberflächenelektrode zu entkoppeln ist in der DE 100 17 331 C1 offenbart. Dort wird vorgeschlagen, zwischen Grundmetallisierung und Außenelektrode eine elektrisch leitende Pulverschicht einzubringen. Eine solche Anordnung verhindert zwar den Rissfortschritt, ist aber technisch nur unter erheblichen Aufwendungen zuverlässig zu realisieren, da der elektrische Kontakt der Pulverteilchen mit der inneren und äußeren Elektrode und untereinander nur über Berührung erfolgt, was einen Kontaktmindestdruck erfordert. Weiterhin sind berührende Kontakte sehr stark gegenüber Korrosionsercheinungen anfällig.

Die WO 00-79607 A1 und WO 00-63980 A1 offenbaren Lösungen, die darauf abzielen, jede der an die Oberfläche herausgeführten Elektroden einzeln zu kontaktieren. Bei Elektrodenabständen von 50 - 250  $\mu\text{m}$  ist dies jedoch nicht kostengünstig umsetzbar.

Aus dem Vorgenannten ist es daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material anzugeben, mit dessen Hilfe es gelingt einen Aktor mit hoher Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität zu schaffen, welcher darüber hinaus in der Lage ist, hohen Druckkräften bei geringem Aktorquerschnitt Stand zu halten. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung einen monolithischen Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material zu schaffen, wobei dieser neuartige Aktor über verbesserte Gebrauchseigenschaften verfügen soll.

Letztendlich gilt es, eine elektrische Außenkontaktierung für einen monolithischen Vielschichtaktor anzugeben, welche das Auftreten von Überschlägen aufgrund von Risserscheinungen hinein in die Grundmetallisierung wirksam verhindert und die mit üblichen Prozessen in der Elektronikindustrie hergestellt werden kann.

5

Die verfahrensseitige Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt mit einer Lehre in der Definition nach Patentanspruch 1.

10

Bezüglich des Vielschichtaktors selbst sei auf die Merkmalskombination nach Anspruch 13 und mit Blick auf die elektrische Außenkontaktierung auf die Merkmale gemäß Anspruch 21 verwiesen.

15

Die Unteransprüche stellen jeweils mindestens zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen des Erfindungsgegenstandes dar.

20

Der Grundgedanke der Erfindung liegt unter Berücksichtigung der in den Ansprüchen konkretisierten Lehre darin, entlang der Aktorachse und im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Aussenflächen, zu denen die inneren Elektroden wechselseitig herausgeführt werden, Mikrostörungen im Aktorgefüge so einzubauen, dass diese als quasi am vorbekannten Ort stehende Rissquelle wirken, wobei das Risswachstum kontrollierbar ist.

25

Die Aussenkontaktierung wird durch eine in Ansicht bekannter Weise mittels Dick- oder Dünnschichttechnologie realisierte Grundmetallisierung gebildet, wobei die Elektrodenbereiche zwischen den Orten der Mikrostörungen und möglicher, nach außen reichende Risse durch eine dehnungsresistente, zweite Aussenelektrode miteinander verbunden werden.

30

Durch den gezielten Einbau von Gefügeschwächungen, die als potentielle Rissquelle wirken, kann eine weitere Rissbildung gezielt gesteuert werden. Bei einem Abstand der Rissquellen im Bereich von ein 1 - 4, bevorzugt 2 - 3 mm werden die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut, dass in den Abschnitten zwischen den Rissquellen auch bei zyklischer Belastung von weit über  $10^9$  Zyklen keine weitere Rissbildung beobachtet wird.

35

Von erfindungswesentlicher Bedeutung ist, dass die gezielt eingebrachten Mikrostörungen im Aktorgefüge selbst noch keinen Riss im eigentlichen Sinne darstellen. Der

gezielt gesteuerte Riss entsteht erst nach der Polarisierung des Aktors und zwar nur in dem Umfang, wie beim Polarisieren remanente Dehnungen gegeben sind. Dadurch, dass das Gefüge beim Schritt des Aufbringens der Grundmetallisierung noch geschlossen ist, dringt auch keine Metallisierungsmasse in das piezokeramische Material ein, was zu einer wesentlichen Qualitätsverbesserung derartig realisierter Aktoren führt.

Die Mikrostörungen verhindern örtlich begrenzt das Zusammensintern der Grünfolien mit dem Ergebnis einer dezidierten Delaminierung.

Zum Erreichen dieses Delaminierens besteht die Möglichkeit im Bereich gewünschten Mikrostörungen beim Stapelaufbau einer Schicht oder Mengen eines organischen Binders aufzubringen, welche einen Volumenanteil von bis zu 50% organischer Partikel mit einem Durchmesser  $\leq 200$  nm enthält, die beim Sinterprozess nahezu vollständig ausbrennen.

Diese vorgeschriebene Schicht kann durch Siebdruck aufgebracht werden und wird vor dem Sintern durch Pressen derart verdichtet, dass die in den Grünfolien eingebetteten Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammensintern ganz oder teilweise zu unterbinden.

Alternativ besteht die Möglichkeit die Mikrostörungen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von  $\leq 1$   $\mu$ m auszubilden, wobei diese Füllpartikel nicht mit den piezoelektrischen Werkstoff des Stapels reagieren. Die Füllpartikel werden in an sich bekannter Weise dem Binder zugesetzt und stellen ein Bestandteil des Letzteren dar.

Bei einer weiteren Ausführungsform besteht die Möglichkeit die Mikrostörungen durch Kerbanrisse zu induzieren, wobei diese Kerbanrisse entweder im grünen oder gesinterten Zustand erzeugt werden, ohne jedoch die tragende Querschnittsfläche des Aktorstapels zu reduzieren.

Dadurch, dass die Lage potentieller Risse durch das definierte Einbringen der Mikrostörungen bekannt ist, besteht die Möglichkeit in Kenntnis dieser Position oder Lage die Aussenkontaktierung auszugestalten. Erfindungsgemäß besteht die Aussenkontaktierung jeweils aus einer flächigen Biegegelelektrode, welche mit der Grund-

metallisierung mindestens im Bereich zwischen den Mikrostörungen elektrisch in Verbindung steht.

Konkret kann die flächige Biegeelektrode einen aufgelöteten Kupfer/Berylliumstreifen umfassen, wobei der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufweisende Abschnitte umfasst. Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen verläuft im Bereich der jeweiligen Mikrostörung.

Bei einer Alternative ist die Biegeelektrode als Mäander- oder Doppelmäanderelektrode ausgeführt, wobei die Verbindungsabschnitte des Mäanders jeweils im Bereich der Mikrostörungen verlaufen.

Auf den Biegeelektroden befinden sich Lötabschnitte oder Lötunkte zur Kontaktierung mit der Grundmetallisierung und/oder zur weiteren Verdrahtung.

Die Stapelanordnung, welche den Aktor bildet, umfasst elektrodenfreie passive Endschichten als Kraftkoppelflächen.

Der Abstand der ersten Mikrostörung zur passiven Endschicht ist gleich dem ganzen oder halben Abstand der übrigen, über die Längsachse verteilten Mikrostörungen gewählt.

Der erfindungsgemäße Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material weist entlang der Stapellängsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden delaminierende Mikrogefügestörungen auf, wobei dort die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitigem Erhalt der Druckfestigkeit des Stapels verringert ist.

Weiterhin besitzt der monolithische Vielschichtaktor jeweils dehnungsresistente, flächige Aussenelektroden, welche nur punktuell mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den delaminierenden Mikrogefügestörungen verbunden ist.

Die Aussenelektrode kann in einer Ausführungsform als Mäander oder Doppelmäander mit Biegegelenkfunktion gestaltet sein. Auch besteht die Möglichkeit diese Aussenelektrode als Aneinanderreihung offener Ellipsen im Sinne eines Ellipsenringes mit Biegegelenkfunktionen auszubilden, wobei zwischen den Ellipsen im wesentli-



chen in Richtung der Nebenachsen verlaufend ein Verbindungs- und Kontaktierungssteg vorhanden ist.

Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen der Aussenelektrode verläuft im wesentlichen im Bereich der Mikrogefügestörungen. Dort möglicherweise entstehende, nach aussen dringende Risse ziehen keine elektrische Unterbrechung der Kontaktierung nach sich.

Am oberen und/oder unteren Ende des Aktors ausgebildete passive Endsichten können als monolithische Isolatorschicht ausgebildet werden, welche Koppellemente trägt oder aufnimmt.

Die erfindungsgemäße elektrische Außenkontaktierung für einen monolithischen Vielschichtaktor besteht aus Aussenelektroden in Form eines dehnungsresistenten, quasi elastischen, nur punktuell mit der Grundmetallisierung verbunden metallischen, respektive leitfähigen Streifen, welche eine Vielzahl von einzelnen, in einer Ebene befindlichen Biegegeelenken besitzt. Die Streifen sind z. B. aus einer Kupfer/Beryllium-Legierung gefertigt oder bestehen aus einem vergleichbare Eigenschaften aufweisenden Material.

Zusammenfassend liegt der Lösungsansatz der Erfindung darin, gezielt in dem Aktormaterial für Gefügeschwächungen Sorge zu tragen, so dass an dann bekannten Stellen Risse entstehen und zwar erstmals dann, wenn der Aktor einer Polarisierung unterworfen wird. Dadurch, dass die Lage der gezielten erzeugten Risse bekannt ist, kann durch eine entsprechende dehnbare Elektrodenkonfiguration dafür gesorgt werden, dass eine elektrische Kontaktierung in jedem Fall sicher stattfindet bzw. erhalten bleibt.

Bekanntermaßen findet ein Risswachstum im wesentlichen senkrecht zur Aktorlängsachse und zwar in beiden Richtungen, das heißt sowohl ins Innere des Aktors hinein als auch nach aussen zur Grundmetallisierung hin statt. Dies ist üblicherweise ein negativer Effekt. Da aber erfindungsgemäß die Aussenkontaktierung aufgrund der bekannten Lage der Risse modifizierbar ist, können potentielle Risse von vornherein überbrückt werden und es werden die im Stand der Technik gegebenen Ausfallerscheinungen reduziert.

Gemäß dem Stand der Technik ist es notwendig eine möglichst hohe Anzahl von Kerben oder Schlitzte, insbesondere auch im Endbereich des Aktors einzubringen, da die Spannungsverhältnisse im Aktor selbst nicht bekannt sind. Jeder der einzubringenden Kerben oder Schlitzte führt aber zu einer verringerten mechanischen Stabilität und damit Belastbarkeit des Aktors selbst.

Bei der vorliegenden Erfindung werden zwar gezielte Gefügeveränderungen eingebaut, die potentiell auch einen Riss nach sich ziehen können, wenn entsprechende Spannungen auftreten, dies ist aber nicht vergleichbar mit einer von vornherein unabwendbaren mechanischen Schwächung des Gefüges durch einen Schlitz, der beispielsweise durch Fräsen, Einkerbungen oder ähnlich erzeugt wird. Die aus dem Stand der Technik bekannten Schlitzte entsprechen einem Materialabtrag. Der materialabgetragene Bereich des Aktors leistet aber augenscheinlich keinen Festigkeitsbeitrag mehr.

In dem Falle, wenn in die Binderschicht größere, ein zusammensintern verhindernde Partikel eingebracht werden verbleibt der vorteilhafte Effekt, dass eine Tragfähigkeit- oder Kraftübernahme durch diese Partikel gewährleistet ist, die einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Gesamtstabilität leisten. Hierbei ist wesentlich, das beim Aktor selbst nur Druckkräfte in Richtung der Aktorlängsachse interessieren.

Die Kerbanrisse nach der Erfindung sind keinesfalls vergleichbar mit den makroskopischen Kerben nach dem Stand der Technik. Hier handelt es sich vielmehr um im Mikrometerbereich liegende Eindrücke, die quasi mit dem Eindrücken eines Probekörpers, wie aus der Materialprüfung bekannt, vergleichbar sind.

Wie oben erläutert, ist dafür Sorge zu tragen, dass bei dem Übereinanderschichten der einzelnen Folien zwischen ausgewählten Bereichen von Folien oder Schichten ein Delaminationseffekt eintritt. Dieses bedeutet, dass dort eine Zugbeanspruchung nicht möglich ist, jedoch die benachbarten Folien so dicht aufeinanderliegen, dass eine Druckkraftübertragung möglich wird und zwar im Gegensatz zu den Bereichen mit Schlitz oder Kerbe nach dem Stand der Technik.

Bei einer Ausführungsform kann der Abstand zwischen zwei wechselseitig herausgeführten Elektroden in einem oberen und/oder unteren Endbereich des Aktors doppelt so groß sein wie zu den darunterliegenden, benachbarten Elektroden. Aufgrund

des größeren Abstandes ist ein Hineinwandern eines durch das veränderte Mikrogefüge bedingten Risses in den Elektrodenbereich und damit ein Unterbrechen der Elektrode im Inneren des Aktors verhinderbar. Der Nachteil einer dort vorliegenden anderen Feldstärke wird auf jeden Fall vom Vorteil des aktiven Leistungsbeitrages des Aktors in diesem Bereich aufgehoben.

Der Erfindung soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen sowie unter Zuhilfenahme von Figuren näher erläutert werden.

10 Hierbei zeigen:

Figur 1 eine prinzipielle Stapelaktoranordnung nach dem Stand der Technik;

Figur 2a ein erfindungsgemäßer Aktor vor der Polarisierung;

Figur 2b ein Aktor nach der Polarisierung;

Figur 3a eine Ausführungsform der Aussenkontaktierung mit Mäanderelektrode;

Figur 3b eine Ausführungsform der Aussenelektrode mit offenen Ellipsen;

Figur 4a eine Schnittdarstellung eines erfindungsgemäßen Aktors mit verändertem Abstand gegenüberliegender Innenelektroden in vorgegebenen Endbereichen und

Figur 4b eine Seitenansicht eines Teiles eines erfindungsgemäßen Aktors mit erkennbarer Elektrodenanordnung in Form von Biegegelenken, ausgebildet als offene, durch Stege verbundene Ellipsen.

Die in der Figur 1 gezeigte Ausführungsform eines Vielschichtaktors nach dem Stand der Technik geht von einer Interdigitalenelektrodenanordnung aus. Mit dem Bezugszeichen 1 ist der Aktor selbst, mit dem Bezugszeichen 2 sind die piezokeramischen Schichten benannt. Die inneren Elektroden 3 und 4 sind jeweils auf die gegenüberliegenden Flächen bis an die Oberfläche herausgeführt. Die Grundmetallisierung 5 dient der Parallelschaltung der jeweiligen Elektrodengruppe. Ein inaktiver Bereich 6

des Aktors 1 wird weder beim Polarisieren noch beim Betrieb des Aktors 1 piezoelektrisch gedehnt und bildet ein Spannungsrisspotential.

Der erfindungsgemäße Aktor gemäß dem Ausführungsbeispiel nach den Figuren 2a und 2b umfasst piezokeramische Schichten 2 mit einer Dicke im Bereich von 20 - 100  $\mu\text{m}$ . Diese Schichten sind durch innere Elektroden 3 und 4, vorzugsweise bestehen aus einer AgPd-Legierung miteinander verbunden, die wechselseitig auf gegenüberliegende Oberflächen herausgeführt sind.

Die herausgezogene Elektroden 3, 4 werden über eine Grundmetallisierung 5, die auf den Seitenoberflächen aufgebracht wird, miteinander verbunden, so dass eine elektrische Parallelschaltung der einzelnen piezoelektrischen Schichten resultiert.

Im Bereich 6, der nicht bis zur Oberfläche herausgezogenen Elektroden 3, 4 entstehen aufgrund der inhomogenen elektrischen Feldverläufe in bekannter Weise bei der Polarisation oder beim Betrieb des Aktors mechanische Spannungskonzentrationen, insbesondere Zugspannungen, die letztendlich Ursache für eine unerwünschte, unkontrollierte Rissbildung sind.

Durch den gezielten Einbau von Gefügeschwächungen, die als Rissquelle 7 wirken, kann die Rissbildung gesteuert werden.

Bei einem Abstand der Rissquellen 7 im Bereich von 1 - 4 mm, bevorzugt 2 - 3 mm können die inneren mechanischen Spannungen so abgebaut werden, dass in den Abschnitten zwischen den Rissquellen, auch bei Belastungen von weit über  $10^9$  Zyklen keine weitere Rissbildung beobachtet wird.

Figur 2b zeigt den erfindungsgemäßen Aktor nach der Polarisation. Hier ist die Entspannungswirkung schematisch dargestellt. Von der Rissquelle 7 geht dabei einerseits ein gezieltes Risswachstum 8 in das Innere des Aktors aus, welches durch eine geeignete energiesenkende Gefügebrauchung über Vorgabe von Korngrößen und Porosität von selbst gestoppt oder unterbrochen wird.

Andererseits ergibt sich aber auch ein Risswachstum in die Grundmetallisierung an der Stelle 9 hinein, welches im ungünstigsten Fall zur Durchtrennung der Grundmetallisierungsschicht 5 führt.

Beim gezeigten Ausführungsbeispiel erfolgt die elektrische Verbindung der einzelnen Bereiche durch einen bogenförmig verlegten Draht 10, der punktuell über einen Löt- punkt 11 mit der Grundmetallisierung verbunden ist.

- 5 Die vorstehend erwähnten Rissquellen sind auf verschiedene Weise in den Aktor implementierbar. Grundsätzlich gilt es, an vorbestimmten Stellen ein Zusammensin- tern der aufeinandergestapelten und verpressten Grünfolien ganz oder partiell zu verhindern, so dass an diesen Stellen die Zugfestigkeit im Vergleich zum umgeben- den Gefüge verringerbar ist. Vorstehendes wird dadurch erreicht, dass in den vorge-  
10 gebenen Bereichen beim Aufbau der Stapel eine Schicht eines organischen Binders durch Siebdruck aufgetragen wird, die mit einem Volumenanteil von bis zu 50% mit organischen Partikeln mit einem Durchmesser  $< 200 \text{ nm}$ , die beim Sinterprozess voll- ständig ausbrennen, gefüllt ist.
- Diese Schicht wird in den weiteren Verfahrens- oder Verarbeitungsstufen beim Ver-  
15 pressen auf eine Dicke  $< 1 \text{ }\mu\text{m}$  zusammengepresst und sorgt dafür, dass die in den Grünfolien eingebetteten Keramikkörper sich nicht oder nur partiell berühren, so dass beim Sintern der Materialtransport von Korn zu Korn ganz oder teilweise ver- hindert ist.
- 20 Eine alternative Möglichkeit besteht darin, dass anstelle organischer Füllpartikel an- organische Partikel mit einem Durchmesser  $< 1 \text{ }\mu\text{m}$ , die nicht mit dem piezoelektri- schen Werkstoff reagieren, wie z.B.  $\text{ZrO}_2$  oder Pulver eines gesinterten PZT-Werk- stoffes mit einer im wesentlichen gleichen Zusammensetzung wie der Aktorwerkstoff dem Binder zugesetzt werden.
- 25 Auch können Rissquellen dadurch erzeugt werden, indem entweder im grünen oder im gesinterten Zustand Mikro-Kerbanrisse ausgeführt werden.

Der oben beschriebene Abbau der inneren mechanischen Spannungen durch eine gezielte Risseinbringung in den Aktor besitzt gegenüber den bekannten Lösungen  
30 wesentliche Vorteile. So wird z.B. der belastbare Querschnitt des Aktors nur unwesentlich verringert, da die gezielt erzeugten Rissflächen bei Einwirkung einer Druck- kraft in Richtung der Aktorachse aufeinandergepresst werden und somit zum tra- genden Querschnitt beitragen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass sich der Riss frühestens beim Polarisieren  
35 öffnet und somit beim Aufbringen der Grundmetallisierung keine Metallpartikel in das Innere des Aktors gelangen können. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich ver-

bessere Qualität entsprechend gestalteter Aktoren im Vergleich zum Stand der Technik.

Ein Vorteil besteht auch darin, dass für eine sichere und langzeitstabile elektrische Kontaktierung des Aktors eine einfache, dehnungsresistente Aussenelektrode realisierbar ist, die nur punktuell mit der Grundmetallisierung zwischen den Entspannungsrisen zu verbinden ist.

Eine Ausgestaltung einer dehnungsresistenten bzw. elastischen Aussenelektrode 12 in Schlitz- oder Mäanderform zeigt Figur 3a. Dort sind auch passive Endschichten 14 ohne innere Elektroden gezeigt, die eine Kraftkoppelfläche bilden. Diese Endschichten 14 können z.B. aus einem monolithischen Isolationsmaterial bestehen und dienen der Aufnahme von verschiedenen Koppellementen.

Eine ebenso mit passiven Endschichten 14 versehene Ausführungsform des Aktors zeigt Figur 3b.

Dort ist eine Festkörpergelenke umfassende Aussenelektrode in Form von offenen Ellipsen 13 vorhanden. Die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse verläuft im wesentlichen im Bereich erwarteter Risse. Die einzelnen Ellipsen weisen Stege 15 auf, die der elektrischen Kontaktierung der Ellipsen 13 untereinander dienen. Im Bereich der Stege 15 ist jeweils ein Lötunkt 11 ausgebildet.

Gemäß der Ausführungsform nach Figur 3 ist der Abstand vom ersten Entspannungsris 7 zur passiven Endschicht 14 gleich dem Abstand der Entspannungsrisse untereinander gewählt. Bei der zweiten Ausführungsform nach Figur 3b beträgt der Abstand des ersten Entspannungsris 7 zur passiven Endschicht 14 gleich dem halben Abstand der übrigen Spannungsrisse untereinander.

Die Figur 4a offenbart einen in bestimmten Abschnitten des Aktors vorhandenen größeren Abstand der Innenelektroden 3 und 4. Dieser doppelte Abstand im Vergleich zu benachbarten Innenelektroden reduziert die Gefahr, dass ein dazwischen befindlicher Riss 7 zu den Innenelektroden wandert und deren Kontaktierung hin zur Grundmetallisierung bzw. entsprechende elektrische Verbindung unterbricht.

Die in den Figuren 3a und 3b schematisch gezeigte flächige Gestaltung der, z. B. aus Kupfer- Berylliummaterial bestehenden Aussenelektrode ist nur beispielhaft zu verstehen. Grundsätzlich ist jede flächige Aussenelektrodenform geeignet, die in

lateralen Richtung zerstörungsfrei Dehnungs- bzw. Spannungskräfte aufnehmen kann.

Bezugszeichenliste

5		
	1	Aktor
	2	piezokeramische Schicht
	3,4	innere Elektroden
	5	Grundmetallisierung
10	6	inaktiver Bereich des Aktors
	7	Mikrogefügeänderung
	8	durch Polarisierung ausgelöster gezielter Mikroriss
	9	Unterbrechung der Grundmetallisierung
	10	bogenförmig verlegter Draht
15	11	Lötpunkt
	12	mäanderförmige Aussenelektrode
	13	Ellipse einer entsprechend ausgebildeten Aussenelektrode
	14	Endbereiche der Aktors, bevorzugt als monolithische Isolations- schicht ausgeführt
20	15	Verbindungsstege der Ellipsenform - Aussenkontaktierung

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines monolithischen Vielschichtaktors aus einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor als Stapel-  
5 anordnung in quasi mechanischer Reihenschaltung einer Vielzahl von Piezoplatten durch Sintern von Grünfolien ausgebildet wird, vorhandene Innenelektroden im Plattenstapel zu gegenüberliegenden Aussenflächen des Stapels geführt und dort mittels Grundmetallisierung sowie Aussenkontaktierung jeweiliger Elektroden-  
gruppen parallel verschalten sind,  
10 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass entlang der Stapellängsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden, von diesen beabstandet, im Bereich der mindestens zwei gegenüberliegenden Aussen-  
flächen, zu denen die Innenelektroden herausgeführt sind, gezielt Mikrostörungen im Aktorgefüge eingebaut werden, welche frühestens beim Polarisieren des Aktors  
15 einem vorgegebenen, begrenztem, spannungsabbauendem Wachstum in das Innere des Aktors unterliegen und weiterhin die Grundmetallisierung und/oder die Aussen-  
kontaktierung mindestens im Bereich der Mikrostörungen im Aktorgefüge dehnungs-  
resistent oder elastisch ausgebildet ist.
- 20 2. Verfahren nach Anspruch 1,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Mikrostörungen örtlich begrenzt ein Zusammensintern der Grünfolien verhindern.
3. Verfahren nach Anspruch 2,  
25 d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass im Bereich der Mikrostörungen beim Stapelaufbau eine Schicht oder Menge eines organischen Binders aufgebracht wird, welche einen Volumenanteil von bis zu 50 %  
organischer Partikel mit einem Durchmesser  $\leq 200$  nm enthält, die beim Sinter-  
prozess nahezu vollständig ausbrennen.
- 30 4. Verfahren nach Anspruch 3,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Schicht durch Siebdruck aufgebracht wird, wobei diese Schicht vor dem Sintern durch Pressen derart verdichtet wird, dass die in den Grünfolien eingebetteten  
35 Keramikpartikel sich nur teilweise oder nicht berühren, um gezielt ein Zusammen-  
sintern ganz oder teilweise zu unterbinden.



5. Verfahren nach Anspruch 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

die Mikrostrukturen durch eine Menge anorganischer Füllpartikel mit einem Durchmesser von  $\leq 1 \mu\text{m}$ , welche nicht mit dem piezoelektrischen Werkstoff des Stapels reagieren, ausgebildet sind, wobei die Füllpartikel dem Binder zugesetzt werden.

6. Verfahren nach Anspruch 2,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

die Mikrostörungen durch Kerbanrisse induziert sind, welche entweder im grünen oder gesinterten Zustand erzeugt werden, jedoch ohne die tragende Querschnittsfläche des Aktorstapels zu reduzieren.

7. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

die Aussenkontaktierung in Kenntnis der Lage der eingebrachten oder vorgesehenen Mikrostörungen erstellt wird, wobei die Aussenkontaktierung jeweils eine flächige Biegeelektrode umfasst, welche mit der Grundmetallisierung mindestens im Bereich zwischen den Mikrostörungen punktuell oder abschnittsweise elektrisch in Verbindung steht.

8. Verfahren nach Anspruch 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

die Biegeelektrode aus einem aufgelöteten Kupfer/Beryllium-Streifen besteht und der Streifen jeweils offene Ellipsenform aufweisende Abschnitte umfasst, wobei die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipse jeweils im Bereich einer der Mikrostörungen verläuft.

9. Verfahren nach Anspruch 7,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

die Biegeelektrode als Mäander- oder Doppelmäanderelektrode ausgeführt ist, wobei die Verbindungsabschnitte des Mäanders jeweils im Bereich der Mikrostörungen verlaufen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
auf den Biegeelektroden Lötabschnitte oder Lötunkte zur weiteren Verdrahtung  
vorgesehen sind.

5

11. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
auf die Stapelanordnung elektrodenfreie passive Endschichten als Kraftkoppelflächen  
aufgebracht werden.

10

12. Verfahren nach Anspruch 11,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
der Abstand der ersten Mikrostörung zur passiven Endschicht gleich dem ganzen  
oder halben Abstand der übrigen über die Längsachse verteilten Mikrostörungen  
gewählt wird.

15

13. Monolithischer Vielschichtaktor aus einem piezokeramischen oder elektro-  
striktiven Material, wobei der Aktor eine Stapelanordnung von Piezoplaten ist,  
welche über innere Elektroden, eine gemeinsame Grundmetallisierung sowie  
Aussenkontaktierung verfügt,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
entlang der Stapellängsachse im wesentlichen parallel zu den Innenelektroden,  
delaminierende Mikrogefügestörungen vorhanden sind, welche die Zugfestigkeit im  
Vergleich zum umgebenden Gefüge bei gleichzeitigem Erhalt der Druckfestigkeit des  
Stapels verringern.

20

25

14. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 13,  
gekennzeichnet durch eine dehnungsresistente, flächige Aussenelektrode, welche  
nur punktuell mit der Grundmetallisierung im Bereich zwischen den delaminierenden  
Mikrogefügestörungen verbunden ist.

30

15. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
die Aussenelektrode ein flächig strukturierter Kupfer/Beryllium-Streifen ist.

35

16. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
die Aussenelektrode die Form eines Mäanders oder Doppelmäanders mit Biege-  
gelenkfunktion aufweist.

- 5 17. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 14,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
die Aussenelektrode die Form aneinandergereihter, offener Ellipsen mit Biege-  
gelenkfunktion aufweist, wobei zwischen den Ellipsen im wesentlichen in Richtung  
der Nebenachsen ein Verbindungs- und Kontaktierungssteg vorhanden ist.

10

18. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 17,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
die Hauptachse der jeweiligen offenen Ellipsen der Aussenelektrode im wesentlichen  
im Bereich der Mikrogefügestörungen verläuft.

15

19. Monolithischer Vielschichtaktor nach einem der Ansprüche 13 bis 18,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
elektrodenfreie passive Endschichten am oberen und/oder unteren Ende des Aktors  
ausgebildet sind.

20

20. Monolithischer Vielschichtaktor nach Anspruch 19,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
die passiven Endschichten eine monolithische Isolationsschicht umfassen, welche  
Koppelemente trägt oder aufnimmt.

25

21. Elektrische Aussenkontaktierung für einen monolithischen Vielschichtaktor aus  
einem piezokeramischen oder elektrostriktiven Material, wobei der Aktor eine  
Stapelanordnung von Piezoplaten mit inneren Elektroden und einer  
Grundmetallisierung umfasst,

30

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass  
die Aussenelektrode einen dehnungsresistenten, nur punktuell mit der  
Grundmetallisierung verbundenen metallischen Streifen aufweist, welcher eine  
Vielzahl von einzelnen, in einer Ebene befindlichen Biegegelenken besitzt.

35

22. Elektrische Aussenkontaktierung nach Anspruch 21,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass

der Streifen aus einer Kupfer/Beryllium-Materiallegierung besteht.

23. Elektrische Aussenkontaktierung nach Anspruch 21 oder 22,  
dadurch gekennzeichnet, dass

5 der Streifen die Form eines Mäanders oder Doppelmäanders aufweist.

24. Elektrische Aussenkontaktierung nach Anspruch 21 oder 22,  
dadurch gekennzeichnet, dass

10 der Streifen aus einer Aneinanderreihung von durch Stege verbundenen offenen  
Ellipsen besteht, wobei die Kontaktierung bevorzugt im Bereich der Stege erfolgt.

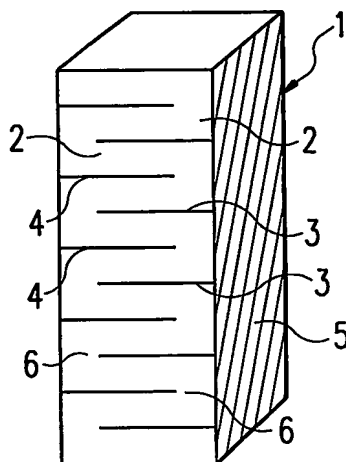


Fig. 1

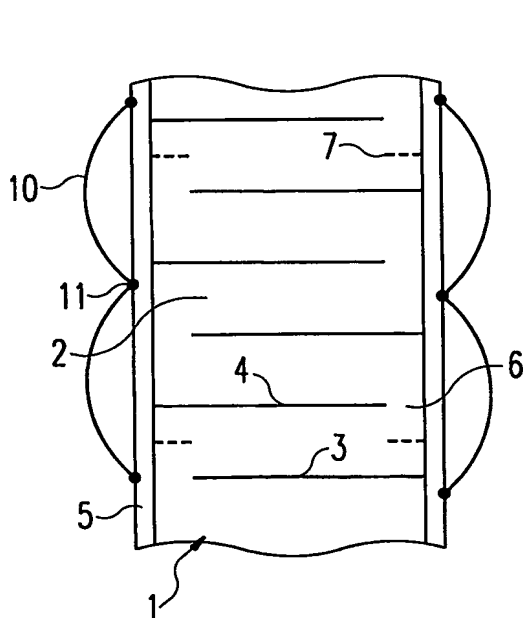


Fig. 2a

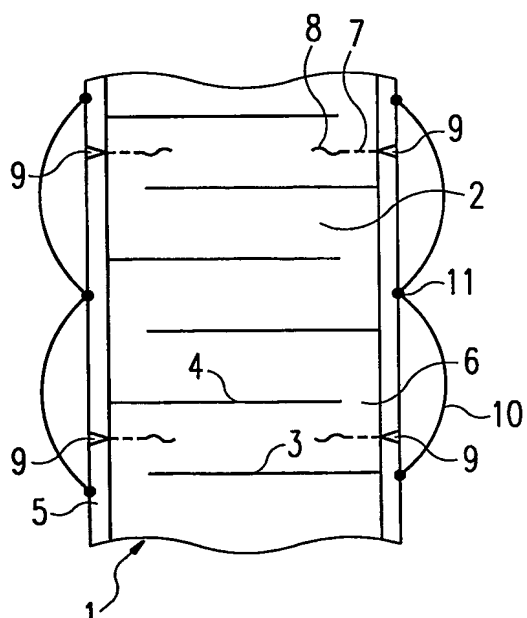


Fig. 2b

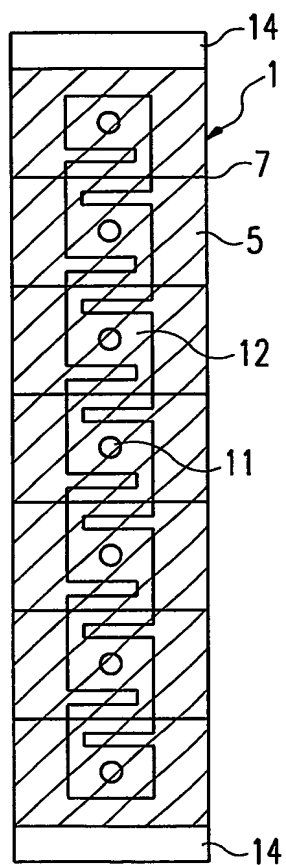


Fig. 3a

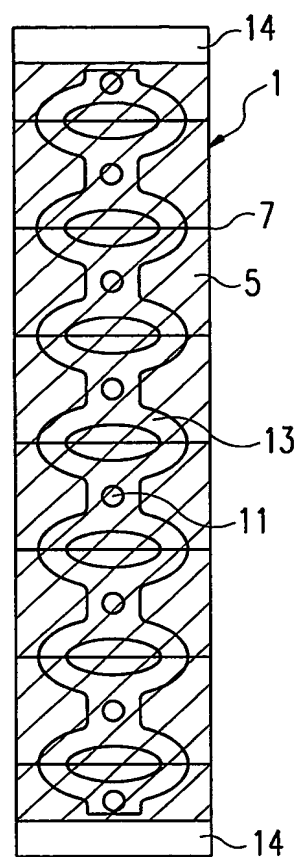


Fig. 3b

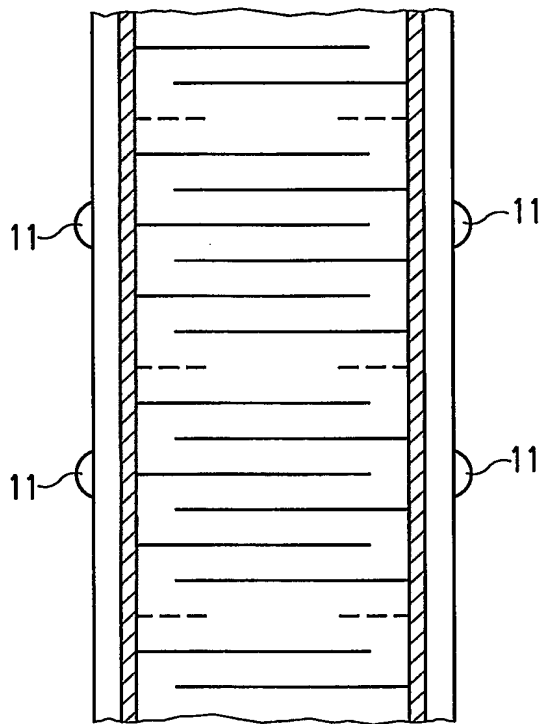


Fig. 4a

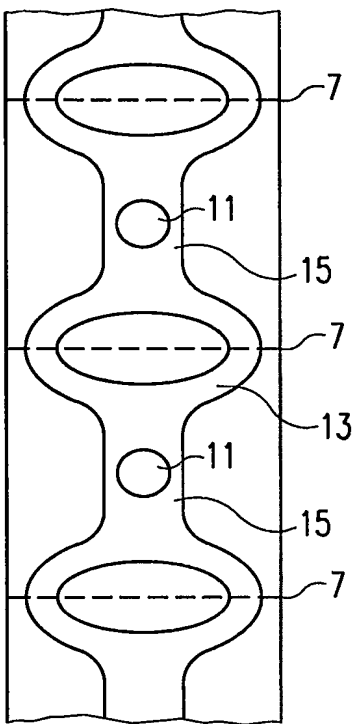


Fig. 4b